

**С. В. Московский^{1*}, Д. А. Романов¹, В. Е. Громов¹,
Ю. Ф. Иванов², А. Д. Филяков¹, Е. А. Гаевой**

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

² Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

*da_rom@live.ru

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ МОДИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ

Электровзрывным методом осуществлено модифицирование поверхностного слоя стали марки 5ХНМ и Х12МФ. Выявлено формирование закалочной структуры, представленной пакетным и пластинчатым (двойниковым) мартенситом. Установлено, что упрочняющей фазой модифицированного слоя стали 5ХНМ являются наноразмерные частицы карбидов железа и титана. Электровзрывное модифицирование стали марки Х12МФ сопровождается формированием структуры перлита пластинчатой морфологии, содержащей округлые включения второй фазы субмикронных размеров. Установлено, что модифицирование электровзрывным методом стали марки 5ХНМ и Х12МФ способствует повышению микротвердости и износостойкости материала, что особенно ярко выражено в стали марки Х12МФ.

Ключевые слова: штамповая сталь, электровзрывное напыление, микротвердость, износостойкость, карбид титана, карбид хрома.

**S. V. Moskovskii, D. A. Romanov, V. E. Gromov,
Yu. F. Ivanov, A. D. Filyakov, E. A. Gaevoi**

STRUCTURE AND PROPERTIES OF DIE STEELS MODIFIED BY ELECTROEXPLOSION METHOD

The modification of the surface layer of 5CrNiMo and Cr12MoV steels was done by the electroexplosion method. The formation of hardening structure presented by the packet and lamellar (twinned) martensite is revealed in the modified layer of 5CrNiMo steel. It is stated that the hardening phase of the modified layer of Cr12MoV steel is the nanodimensional particles of iron and titanium carbides. The electroexplosion modification of Cr12MoV steel is accompanied by the structure formation of the lamellar morphology pearlite containing the round inclusions of the second phase of submicron sizes. It is stated that the electroexplosion method modification of 5CrNiMo and Cr12MoV steels contributes to the increase in microhardness and wear resistance of the material and it is most pronounced in the case of Cr12MoV steel.

Key words: die steel, electroexplosion spraying, microhardness, wear resistance, titanium carbide, chromium carbide.

Одной из областей применения метода электровзрывного напыления (ЭВН) является модификация поверхностных слоев материалов, используемых для формирования покрытий с высокой твердостью. Метод позволяет наносить покрытия из продуктов взрыва проводников, а при добавлении в область взрыва порошковых навесок различных веществ — осуществлять формирование композиционных покрытий, обладающих адгезией с основой на уровне когезии и высокими функциональными свойствами.

Цель настоящей работы заключалась в модифицировании импульсной пламенной струей продуктов электрического взрыва композиционных проводников TiC-Ni-Al и $\text{TiC-Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ поверхности штамповых сталей марки 5ХНМ и Х12МФ и в изучении их структурно-фазового состояния и свойств.

В качестве материала исследования были использованы стали марки Х12МФ и 5ХНМ. Электровзрывное модифицирование поверхности образцов стали осуществляли на установке ЭВУ 60/10 М (энергоемкость до 60 кДж; собственная частота разряда 10 кГц; максимальное значение заряда 5 кВ; средняя потребляемая мощность 0,55 кВт) с характерными значениями поглощаемой плотности мощности при обработке поверхности материала порядка 10^9 Вт/м², давления в ударно-сжатом слое плазмы вблизи облучаемой поверхности порядка $10^6\text{--}10^7$ Па, времени обработки 100 мкс. Покрытия наносили на образцы размером 15×15×5 мм. Режим термосилового воздействия на облучаемую поверхность задавали выбором зарядного напряжения емкостного накопителя энергии установки, по которому рассчитывали поглощаемую плотность мощности. Электровзрывное напыление проводили с использованием композиционного электрически взрываемого проводника (КЭВМ). При напылении на сталь марки Х12МФ покрытий системы $\text{TiC-Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$, в никелевую оболочку КЭВМ массой 350 мг были заключены порошки TiC и Cr_3C_2 массами 100 и 250 мг соответственно. При напылении на сталь 5ХНМ покрытий системы TiC-Ni-Al , в алюминиевую оболочку КЭВМ массой 60 мг были заключены порошки TiC и Ni массами 40 и 90 мг соответственно. Поглощаемая облучаемой поверхностью плотность мощности при напылении составляла 4,8 ГВт/м², диаметр никелевого сопла разрядной камеры плазменного ускорителя — 20 мм, расстояние образца от среза сопла — 20 мм. Исследования твердости модифицированного слоя сталей осуществляли на поперечных шлифах на расстоянии 14 мкм от поверхности модифицированного слоя и на расстоянии 14 мкм от границы раздела модифицированного слоя и зоны термического влияния стали. Использо-

ли ультрамикротвердомер Shimadzu DUH-211S. Нагрузка на индентор 30 мН; скорость нагружения и разгрузки 60 мН/мин. Трибологические испытания модифицированного слоя осуществляли на приборе Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при нормальной нагрузке 12 Н на индентор (шар диаметром 5 мм из Al_2O_3), скорости скольжения 25 мм/с и длине скольжения 50 м, температуре 25 °С в атмосфере воздуха. Фазовый состав, морфологию фаз, состояние дефектной субструктуры модифицированного слоя анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (FEI Tecnaï G2 20 TWIN с микроанализатором EDAX). Фольги для исследования материала методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии изготавливали методом ионного утонения.

Рассмотрим результаты исследования твердости и модуля Юнга модифицированного слоя стали марки 5ХНМ и Х12МФ. Исследование твердости модифицированного слоя стали осуществляли вдоль прямых, проведенных параллельно поверхности модифицирования и границы раздела «модифицированный слой — зона термического влияния» и расположенных на расстоянии 14 мкм от них. В работе получено, во-первых, кратное (в 2 и 4 раза) превышение твердости модифицированного слоя над твердостью стали 5ХНМ и Х12МФ в исходном состоянии и, во-вторых, высокий уровень неоднородности модифицированного слоя по твердости, что особенно характерно для слоя, расположенного вблизи поверхности модифицирования. Данные замечания можно отнести и в отношении величины модуля Юнга.

Анализ полученных результатов трибологических испытаний стали марки 5ХНМ свидетельствует о том, что модифицирование стали 5ХНМ способствует снижению примерно в 1,2 раза коэффициента износа (увеличение износостойкости) и увеличению (в 1,25 раза) коэффициента трения. В стали марки Х12МФ выявляется снижение примерно в 50 раз коэффициента износа (увеличение износостойкости) и в 1,1 раза коэффициента трения. Таким образом, выполненные испытания стали марок 5ХНМ и Х12МФ, модифицированной электровзрывным методом, выявили повышение микротвердости и износостойкости материала, что обусловлено, очевидно, изменением структуры и фазового состава модифицированного слоя стали.

Исследования модифицированного слоя стали марки 5ХНМ, выполненные методами дифракционной электронной микроскопии, выявили закалочную структуру, представленную пластинчатым (двойниковым) и пакетным (реечным) мартенситом. В объеме кристаллов мартенсита обнаруживается дислокационная субструктура в виде мно-

гослойных сеток. Скалярная плотность дислокаций превышает значение 10^{10} см^{-2} , что характерно для закаленной стали. Исследование фазового состава модифицированного слоя стали выявили присутствие в кристаллах мартенсита частиц пластинчатой (игольчатой) формы, которые являются частицами карбида железа (цементит). Можно предположить, что частицы цементита сформировались в результате «самоотпуска» стали, т. е. отпуска, протекающего в процессе охлаждения стали ниже температуры начала мартенситного превращения. Наряду с частицами цементита, в структуре модифицированного слоя стали марки 5ХНМ обнаружены частицы, имеющие округлую форму и располагающиеся в структуре хаотически либо формирующие небольшие (по 3–5 частиц) скопления. Размеры таких частиц изменяются в пределах 25–40 нм. Можно предположить, что данные частицы были внесены в поверхностный слой стали при электровзрывном модифицировании и, следовательно, являются частицами карбида титана. Таким образом, модифицирование стали марки 5ХНМ электровзрывным методом сопровождается формированием мартенситной структуры пакетной и пластинчатой морфологии. Упрочняющей фазой модифицированного слоя являются наноразмерные частицы карбидов железа и титана.

Исследования модифицированного слоя стали марки Х12МФ, выполненные методами дифракционной электронной микроскопии, выявили структуру перлита преимущественно пластинчатой морфологии. В ферритной составляющей колоний перлита обнаруживается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций или дислокационных сеток. Скалярная плотность дислокаций модифицированного слоя составляет $3,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Особенностью формирующейся структуры модифицированного слоя стали Х12МФ является присутствие большого количества включений второй фазы. Частицы имеют округлую, реже — ограниченную форму, расположенные хаотически в структуре зерен перлита. Размеры частиц изменяются в пределах 100–430 нм. Можно предположить, что данные частицы были внесены (или сформированы) в поверхностный слой стали при электровзрывном модифицировании и являются карбида на основе хрома. Таким образом, модифицирование стали марки Х12 МФ электровзрывным методом сопровождается формированием структуры перлита пластинчатой морфологии. Упрочняющей фазой модифицированного слоя являются пластины цементита перлитных колоний и субмикронные включения карбида хрома.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60032 мол_а_дк и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-1118.2017.2, а также при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований РАН «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий» (проект № 0366-2015-0005).